

**Milan VONDRA<sup>1</sup>**

**EKONOMICKÉ A CELOSPOLEČENSKÉ HODNOCENÍ ASPEKTU VÝSTAVBY DOMŮ  
SPLNŮJÍCÍCH POŽADAVKY NA UDRŽITELNÝ ROZVOJ**

**ECONOMIC AND SOCIETY EVALUATION ASPECT OF CONSTRUCTION BUILDINGS  
REQUIREMENTS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT**

**Abstrakt**

Cílem této práce bylo zhodnotit ekonomické a celospolečenské aspekty výstavby domů splňujících požadavky na udržitelný rozvoj. Pro tyto účely bylo navrženo 7 typů konstrukcí (o různé materiálové základně) pro část stavby hrubá podlaha a nášlapná vrstva podlahy, obvodová stěna a střešní konstrukce. Jednotlivé navržené části staveb mají obdobný součinitel prostupu tepla, splňující danou normu. Vnitřní plocha staveb je jednotná, obestavěná plocha je různá podle tloušťky stěn jednotlivých konstrukcí. Takto sestavené modelové příklady byly následně posouzeny z hlediska stavebního, environmentálního a ekonomického. Výsledky byly dále zpracovávány a porovnávány jak co do absolutních hodnot, tak procentuálních hodnot a v neposlední řadě i z pohledu stanovených poměrových ukazatelů a trapezoidické analýzy. Konečný výsledek pak vedl, do velké míry, k potvrzení hlavní hypotézy, tedy že výstavba z materiálů, které potřebují minimum dodatečných energetických vkladů, je méně energeticky a finančně náročná. Ohledně produkce CO<sub>2</sub> je možné se také s touto částí hypotézy ztotožnit, jelikož náročnost na celkový svázaný spotřebovaný uhlík je u konstrukcí s dominantní materiálovou skladbou na bázi obnovitelných materiálů zpravidla nižší. Nutno podotknout, že tato analýza byla změřena na jednopodlažní budovy, určené k obývání.

**Klíčová slova**

Vázaná energie, svázaný uhlík, kalkulace, cihelné děrované tvárnice, pórobetonové tvárnice, sendvičová dřevostavba, srub, roubenka, panelová konstrukce z masivu, sláma.

**Abstract**

The aim of this work was to evaluate the economic and social aspects of the construction of a home meeting the requirements of sustainable development. For this purpose, it was proposed to 7 types of structures (different material base) for part of the construction of the subfloor and wear layer floors, perimeter wall and roof construction. Each of the constructs parts is similar to the proposed thermal insulation heat flow coefficient, which also meets the standard. The interior area is the single, enclosed area varies according to the thickness of the walls of the individual structures. As drawn up by the model examples were subsequently assessed from construction (total enclosed area), environmental (hardcover embodied energy and carbon) and economic (compiled model calculations of the construction). The results were further processed and compared both in absolute values and percentage values, and not least in view of the established financial ratios and trapezoid analysis. The final result then led, to a large extent, to confirm the main hypothesis, namely that the construction of the materials that they need a minimum of additional energy deposits, it is less energy and financially demanding. Regarding the CO<sub>2</sub> production is also possible with this part hypotheses identify, as the demands on the total carbon is consumed bound structures with the dominant material composition based on renewable materials are usually lower. It is, therefore, of the

---

<sup>1</sup> Ing. Mgr. Bc. Milan Vondra, Ústav lesnické a dřevařské ekonomiky a politiky, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno, tel: +420 774 027 115, e-mail: BLDi7@email.cz.

economic and social point of view preferable to carry out the construction of renewable materials and raw materials. Should be noted that this analysis was measured on buildings single storey, intended for occupancy.

### Keywords

Embodied energy, embodied carbon, calculations, perforated bricks, porous concrete blocks, sandwich wooden house, log cabin, timber, the massive wooden panel construction, straw.

## 1 ÚVOD

Na výstavbu budov může být pohlíženo z různých hledisek. Jeden pohled může být na cenu stavby, jiní řeší ekologickou (ne)náročnost jak z pohledu výstavby (např. použité materiály), tak užívání (např. spotřebovaná energie), další pohledy mohou být zaměřeny na architekturu, problematiku lokalizace stavby apod. Zmiňované pohledy často nebývají provázány a do jisté míry pak nesplňují komplexnější pohled na problematiku výstavby. Tato práce této komplexnosti dosáhnout.

## 2 METODIKA

### 2.1 Metodika analýzy poměrovými ukazateli

Poměrové ukazatele jsou sestaveny pro poměr celkových nákladů na výstavbu (I a II) a celkové obestavěné plochy, celkového svázaného spotřebovaného uhlíku (I a II) a celkové vázané energie (I a II) a celkových nákladů na výstavbu (I a II). Obecně tedy tyto ukazatele mohou být vyjádřeny takto:

$$\Delta_{NCS} = \frac{NC}{S} [\text{Kč} \times \text{m}^{-2}] \quad (1)$$

kde:

- $\Delta_{NCS}$  – poměr celkových nákladů na výstavbu a celkové obestavěné plochy [ $\text{Kč} \times \text{m}^{-2}$ ]
- $NC$  – celkové náklady [Kč]
- $S$  – celková obestavěná plocha [ $\text{m}^2$ ]

$$\Delta_{NCC} = \frac{C}{NC} [\text{kg CO}_{2e} \times \text{Kč}^{-1}] \quad (2)$$

kde:

- $\Delta_{NCC}$  – poměr celkového svázaného spotřebovaného uhlíku a celkových nákladů na výstavbu [ $\text{kg CO}_{2e} \times \text{Kč}^{-1}$ ]
- $C$  – svázaný uhlík [ $\text{kg CO}_{2e}$ ]
- $NC$  – celkové náklady [Kč]

$$\Delta_{NCE} = \frac{E}{NC} [\text{MJ} \times \text{Kč}^{-1}] \quad (3)$$

kde:

- $\Delta_{NCE}$  – poměr celkové vázané energie a celkových nákladů na výstavbu (I a II) [ $\text{MJ} \times \text{Kč}^{-1}$ ]
- $E$  – vázaná energie [MJ]
- $NC$  – celkové náklady [Kč]

Uvedení poměrové ukazatele jsou užity k základnímu posouzení a porovnání sedmi typů konstrukcí. První ukazatel představuje, jaké jsou náklady na  $\text{m}^2$  obestavěné plochy. Další ukazatele představují kolik je spotřebováno svázaného uhlíku na korunu nákladů a poslední představuje to, kolik je spotřebováno vázané energie na korunu nákladů.

### 2.2 Metodika Trapezoidické analýzy

Pro účely porovnání jednotlivých dat byla navržena následující trapezoidická analýza. Analýza sestává z ukazatele: poměru celkových nákladů na výstavbu a celkové obestavěné plochy

( $\Delta_{NCS} \times \mu_{50}$ ), poměru celkového svázaného spotřebovaného uhlíku a celkových nákladů na výstavbu ( $\Delta_{NCC}$ ), poměru celkové vázané energie a celkových nákladů na výstavbu ( $\Delta_{NCE}$ ), celkového součinitele prostupu tepla dané konstrukce ( $U_C$ ).

Trapezoidický graf pak obsahuje čtyři osy, na které jsou nanášeny hodnoty jednotlivých ukazatelů. Plocha vzniknuvší mezi propojenými ukazateli na trapezoidickém grafu pak představuje trapezoidickou plochu. Jednotlivé ukazatele a trapezoidickou plochu je možné využít při porovnávání různých typů konstrukcí.

### 2.2.1 Poměr celkových nákladů na výstavbu a celkové obestavěné plochy

Poměr celkových nákladů na výstavbu a celkové obestavěné plochy představuje horní část svislé osy trapezoidické analýzy v grafickém zobrazení. Stanovení tohoto ukazatele vychází ze stanovení nákladů na výstavbu na obestavěnou plochu, které jsou obecným opravným koeficientem  $\mu$ . Tento koeficient je volen z důvodů možnosti zobrazení daných ukazatelů v jednom rámci. Hodnota tohoto koeficientu se může lišit pro různé typy staveb, avšak pro případ komparace by měla zůstat konstantní. Celkové náklady jsou stanoveny jako součet kalkulací pro jednotlivé stavební části vzhledem k běžným cenám na výstavbu za danou jednotku a rozměrům stavby.

$$\Delta_{NCS} = \frac{NC}{S} = \frac{\Sigma PN(1-17)}{S} \quad (4)$$

kde:

- $\Delta_{NCS}$  – poměr celkových nákladů na výstavbu a celkové obestavěné plochy [ $Kč \times m^{-2}$ ]
- $NC$  – celkové náklady [ $Kč$ ]
- $S$  – celková obestavěná plocha [ $m^2$ ]
- $\Sigma PN (1-17)$  – suma dílčích přímých nákladů [ $Kč$ ] na práci, stroje a materiál

### 2.2.2 Poměr celkového svázaného spotřebovaného uhlíku a celkových nákladů na výstavbu

Poměr celkového svázaného spotřebovaného uhlíku a celkových nákladů na výstavbu představuje pravou horizontální osu. Tento ukazatel je stanoven na základě poměru svázaného uhlíku a celkových nákladů na výstavbu. Svázaný uhlík stavby vychází z rozměrů stavby a materiálového zastoupení. Celkové náklady na výstavbu jsou jako v předcházejícím případě stanoveny jako součet kalkulací pro jednotlivé stavební části vzhledem k běžným cenám na výstavbu za danou jednotku a rozměrům stavby.

$$\Delta_{NCC} = \frac{C}{NC} = \frac{\Sigma_{AS}^e c}{\Sigma PN(1-17)} \quad (5)$$

kde:

- $\Delta_{NCC}$  – poměr celkového svázaného spotřebovaného uhlíku a celkových nákladů na výstavbu [ $kg CO_{2e} \times Kč^{-1}$ ]
- $C$  – svázaný uhlík [ $kg CO_{2e}$ ]
- $NC$  – celkové náklady [ $Kč$ ]
- $\Sigma PN (1-17)$  – suma dílčích přímých nákladů [ $Kč$ ] na práci, stroje a materiál
- $\Sigma_{AS}^e c$  – suma dílčího svázaného uhlíku [ $kg CO_{2e}$ ] pro jednotlivé materiály v konstrukci (1-7)
- $C$  – svázaný uhlík [ $kg CO_{2e}$ ] pro konstrukci (1-7)

### 2.2.3 Poměr celkové svázané energie a celkových nákladů na výstavbu

Ukazatel celkového svázaného spotřebovaného uhlíku a celkových nákladů na výstavbu představuje dolní vertikální osu. Logika stanovení tohoto ukazatele je obdobná jako v případě  $\Delta_{NCC}$  s tím rozdílem, že je zaměřený na vázanou energii.

$$\Delta_{NCE} = \frac{E}{NC} = \frac{\Sigma_{AS}^e e}{\Sigma PN(1-17)} \quad (6)$$

kde:

- $\Delta_{NCE}$  – poměr celkové vázané energie a celkových nákladů na výstavbu (I a II) [MJ×Kč<sup>-1</sup>]
- $E$  – vázaná energie [MJ] pro konstrukci (1-7)
- $NC$  – celkové náklady [Kč]
- $\Sigma PN$  (1-17) – suma dílčích přímých nákladů [Kč] na práci, stroje a materiál
- $\Sigma_{As}^{ze} e$  – suma dílčí vázané energie [MJ] pro jednotlivé materiály v konstrukci (1-7)

## 2.2.4 Celkový součinitel prostupu tepla dané konstrukce

Celkový součinitel prostupu tepla konstrukce je dán jako součet součinitelů prostupu tepla konstrukcí střecha, obvodová stěna (plášť) a podlaha – terén. Užití ukazatele celkového součinitele prostupu tepla konstrukcí zajišťuje do určité míry srovnatelnost mezi jednotlivými domy. Samozřejmě celkovou spotřebu tepla na vytápění ovlivňuje řada faktorů (orientace budovy, umístění budovy v krajině, tvar a velikost budovy, pasivní zisky, typ vytápění, chování uživatele apod.). V rámci srovnatelnosti mezi budovami byl volen model celkového součinitele prostupu tepla.

$$U_c = \Sigma U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{Si} + R + R_{Se}} = \frac{1}{R_{Si} + \left( \sum \frac{d_j}{\lambda_j} \right) + R_{Se}} \quad (7)$$

kde:

- $U_C$  – celkový součinitel prostupu tepla dané konstrukce (1-7)
- $\Sigma U$  – suma součinitelů prostupu tepla [W/(m<sup>2</sup>×K)]
- $R_T$  – odpor konstrukce při prostupu tepla [(m<sup>2</sup>×K)/W]
- $R_{Si}$  – odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce [(m<sup>2</sup>×K)/W]
- $R_{Se}$  – odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce [(m<sup>2</sup>×K)/W]
- $R$  – tepelný odpor konstrukce [(m<sup>2</sup>×K)/W]
- $R_j$  – tepelný odpor j-té vrstvy konstrukce [(m<sup>2</sup>×K)/W]
- $\Sigma \frac{d_j}{\lambda_j}$  – suma (tloušťky  $d_j$  j-té vrstvy konstrukce [m] / návrhový součinitel tepelné vodivosti materiálu  $\lambda_j$  j-té vrstvy konstrukce [W/(m×K)])

## 2.2.5 Trapezoidická analytická plocha

Trapezoidická analytická plocha představuje agregovanou veličinu, která je složena z výše uvedených ukazatelů ( $\Delta_{NCS} \times \mu$ ,  $\Delta_{NCC}$ ,  $\Delta_{NCE}$ ,  $U_C$ ). Tato plocha představuje celkový pohled na posuzovaný objekt. Dá se říct, že čím více se blíží k 0, tím dosahuje budova lepší parametrů. Je však vždy třeba pohlížet na analýzu jako na celek. V některých případech se trapezoidická analytická plocha blíží k 0, ovšem některý z ukazatelů se blíží například k 1. V takovém případě není možné označit takovou budovu za budovu s lepšími parametry. Matematická definice trapezoidické plochy je uvedena ve vzorci níže.

$$S_\tau = \frac{(\Delta_{NCS} \times \mu) \times U_C + (\Delta_{NCS} \times \mu) \times \Delta_{NCC} + \Delta_{NCC} \times \Delta_{NCE} + \Delta_{NCE} \times U_C}{2} \quad (8)$$

kde:

- $S_\tau$  – trapezoidická analytická plocha (ostatní proměnné viz výše)

## 3 VÝSLEDKY

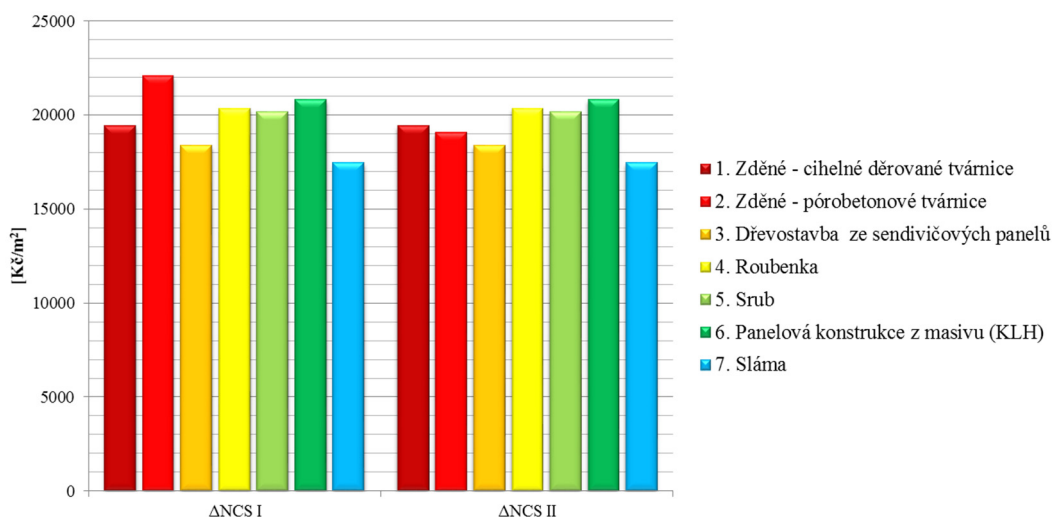
Pro přehlednost je sestavena následující tabulka. V této tabulce jsou uvedeny údaje o celkové obestavené ploše staveb, celkové ploše místností (vzhledem k metodice jsou identické), celkové tloušťce obvodové stěny, celkových nákladů na výstavbu (I a II), celkového spotřebovaného svázaného uhlíku (I a II) a celkové vázané spotřebované vázané energie (I a II). Dále jsou uvedeny poměrové ukazatele  $\Delta_{NCS}$  I,II [Kč×m<sup>-2</sup>],  $\Delta_{NCC}$  I,II [kg CO<sub>2e</sub>×Kč<sup>-1</sup>],  $\Delta_{NCE}$  I,II [MJ×Kč<sup>-1</sup>] a ukazatele trapezoidické analýzy.

Tab. 1: Celkové porovnání

Údaj	1. Zděné - cihelné děrované tvárnice	2. Zděné - pórobetonové tvárnice	3. Dřevostavba ze sendvičových panelů	4. Roubenka	5. Srub	6. Panelová konstrukce z masivu (KLH)	7. Sláma
Celk. obestavěná plocha S [m <sup>2</sup> ]	110,90	107,48	102,49	111,64	109,46	105,25	111,81
Celk. plocha místností [m <sup>2</sup> ]	85,20	85,20	85,20	85,20	85,20	85,20	85,20
Celk. tloušťka obvodové stěny [m]	0,485	0,402	0,2805	0,4925	0,4425	0,3455	0,504
NC I (s DPH) [Kč]	2151850	2370710	1882240	2271250	2205280	2190830	1950650
NC II (s DPH) [Kč]	= NC I	2050510	= NC I	= NC I	= NC I	= NC I	= NC I
C I [kg CO <sub>2</sub> e]	1030287	855001	848109	839786	793751	774242	796135
C II [kg CO <sub>2</sub> e]	= C I	1030287	= C I	= C I	= C I	= C I	= C I
E I [MJ]	1338325	1663624	795708	922232	868520	1077049	639170
E II [MJ]	= E I	1569313	= E I	= E I	= E I	= E I	= E I
Poměrové ukazatele							
$\Delta_{NCS I}$ [Kč×m <sup>-2</sup> ]	19403,52	22057,22	18365,11	20344,41	20146,90	20815,49	17446,11
$\Delta_{NCS II}$ [Kč×m <sup>-2</sup> ]	= $\Delta_{NCS I}$	19078,06	= $\Delta_{NCS I}$	= $\Delta_{NCS I}$	= $\Delta_{NCS I}$	= $\Delta_{NCS I}$	= $\Delta_{NCS I}$
$\Delta_{NCC I}$ [kg CO <sub>2</sub> e×Kč <sup>-1</sup> ]	0,48	0,36	0,45	0,37	0,36	0,35	0,41
$\Delta_{NCC II}$ [kg CO <sub>2</sub> e×Kč <sup>-1</sup> ]	= $\Delta_{NCC I}$	0,50	= $\Delta_{NCC I}$	= $\Delta_{NCC I}$	= $\Delta_{NCC I}$	= $\Delta_{NCC I}$	= $\Delta_{NCC I}$
$\Delta_{NCE I}$ [MJ×Kč <sup>-1</sup> ]	0,62	0,70	0,42	0,41	0,39	0,49	0,33
$\Delta_{NCE II}$ [MJ×Kč <sup>-1</sup> ]	= $\Delta_{NCE I}$	0,77	= $\Delta_{NCE I}$	= $\Delta_{NCE I}$	= $\Delta_{NCE I}$	= $\Delta_{NCE I}$	= $\Delta_{NCE I}$
Trapezoidická analýza							
$\Delta_{NCS I} \times \mu_{50}$	0,39	0,44	0,37	0,41	0,40	0,42	0,35
$\Delta_{NCS II} \times \mu_{50}$	= $\Delta_{NCS I} \times \mu_{50}$	0,38	= $\Delta_{NCS I} \times \mu_{50}$	= $\Delta_{NCS I} \times \mu_{50}$	= $\Delta_{NCS I} \times \mu_{50}$	= $\Delta_{NCS I} \times \mu_{50}$	= $\Delta_{NCS I} \times \mu_{50}$
$\Delta_{NCC I}$	0,48	0,36	0,45	0,37	0,36	0,35	0,41
$\Delta_{NCC II}$	= $\Delta_{NCC I}$	0,50	= $\Delta_{NCC I}$	= $\Delta_{NCC I}$	= $\Delta_{NCC I}$	= $\Delta_{NCC I}$	= $\Delta_{NCC I}$
$\Delta_{NCE I}$	0,62	0,70	0,42	0,41	0,39	0,49	0,33
$\Delta_{NCE II}$	= $\Delta_{NCE I}$	0,77	= $\Delta_{NCE I}$	= $\Delta_{NCE I}$	= $\Delta_{NCE I}$	= $\Delta_{NCE I}$	= $\Delta_{NCE I}$
$U_C$	0,57	0,61 (0,63) <sup>2</sup>	0,54	0,58	0,60	0,63	0,52
$S\tau$	0,53	0,56 (0,64) <sup>2</sup>	0,39	0,39	0,38	0,45	0,32

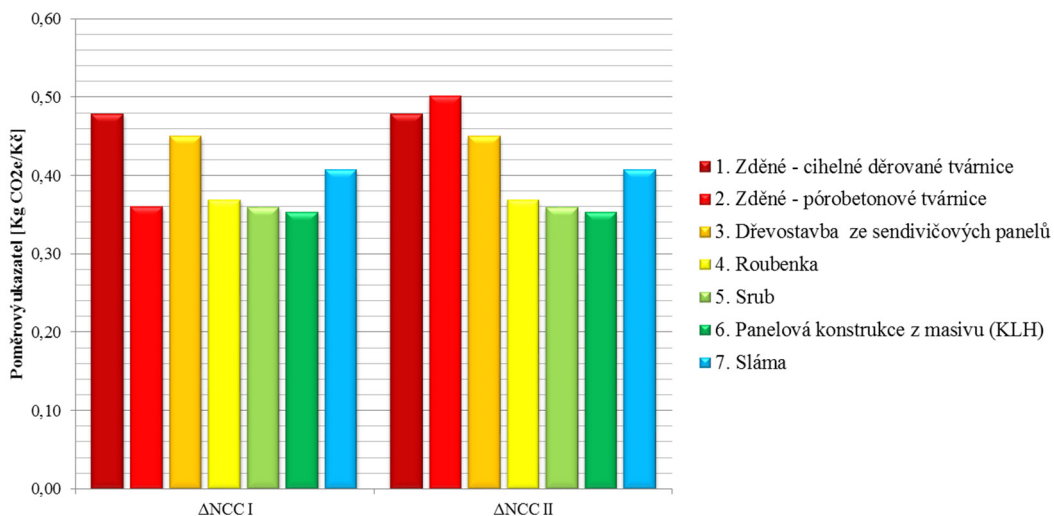
Výše uvedená tabulka je vizualizovaná v následujících grafech. V prvním grafu jsou zobrazeny celkové náklady na výstavbu I a II v porovnání s celkovou obestavěnou plochou. Jak je patrné, tak pro variantu I je nejvíce nákladově náročná konstrukce 2. Zděné – pórobetonová tvárnice, následuje konstrukce 6. Panelová konstrukce z masivu (KLH), 4. Roubenka, 5. Srub, 2. Zděné – pórobetonové tvárnice, 3. Dřevostavba ze sendvičových panelů a 7. Sláma. V případě varianty II je pořadí následující: 6. Panelová konstrukce z masivu (KLH), 4. Roubenka, 5. Srub, 2. Zděné – pórobetonové tvárnice, konstrukce 2. Zděné – pórobetonová tvárnice, 3. Dřevostavba ze sendvičových panelů a 7. Sláma. Tento rozdíl je daný hlavně tím, že konstrukce č. 2. nemá střešní konstrukci zhotovenou z komplexního konstrukčního systému na bázi pórobetonu. Nejvýhodnější je tedy z finančního hlediska konstrukce 7. Sláma.

<sup>2</sup> Varianta II.



Graf 1: Porovnání nákladů na výstavbu k obestavěné ploše [ $\text{Kč} \times \text{m}^{-2}$ ]

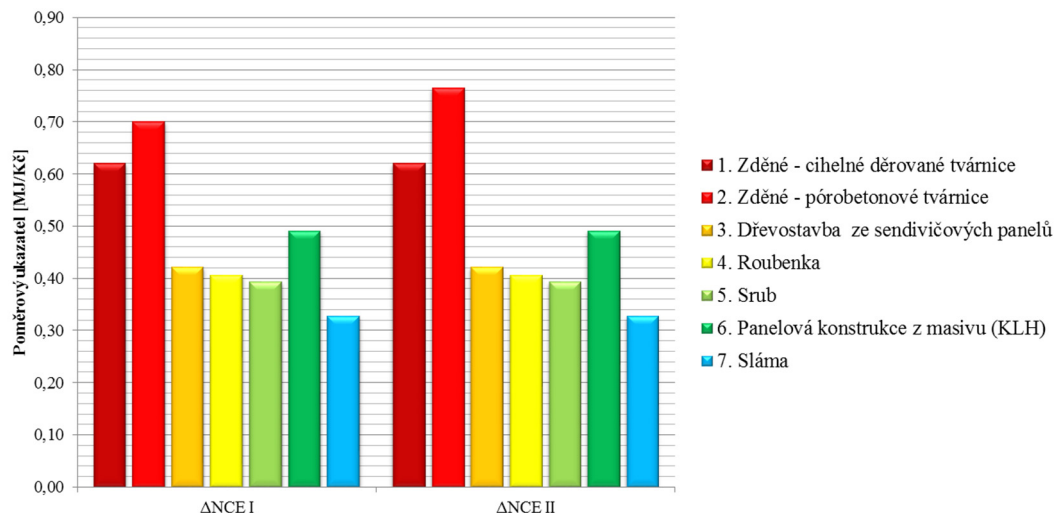
Následující graf zobrazuje porovnání svázaného uhlíku k nákladům na výstavbu. Opět je šetření zobrazeno ve variantě I a II. V případě varianty I dosahuje nejvyšší hodnoty tohoto koeficient konstrukce 1. Zděné – cihelné děrované tvárnice, 3. Dřevostavba ze sendvičových panelů, 7. Sláma, 3. Dřevostavba ze sendvičových panelů atd. V případě varianty II dosahuje nejvyšších hodnot konstrukce 2. Zděné – pórobetonové tvárnice, 1. Zděné – cihelné děrované tvárnice, 3. Dřevostavba ze sendvičových panelů, 7. Sláma atd. Tento poměrový ukazatel zobrazuje, kolik je spotřebováno svázaného uhlíku na jednu korunu nákladů. Nejvýhodnější je konstrukce 6. Panelová konstrukce z masivu (KLH).



Graf 2: Porovnání svázaného uhlíku k nákladům na výstavbu

V tabulce níže je zobrazen ve variantě I a II poměr celkové vázané spotřebované energie na korunu nákladů. V případě varianty I dosahuje nejvyšší hodnoty konstrukce 2. Zděné - pórobetonové tvárnice, následuje 1. Zděné – cihelné děrované tvárnice, 6. Panelová konstrukce z masivu (KLH),

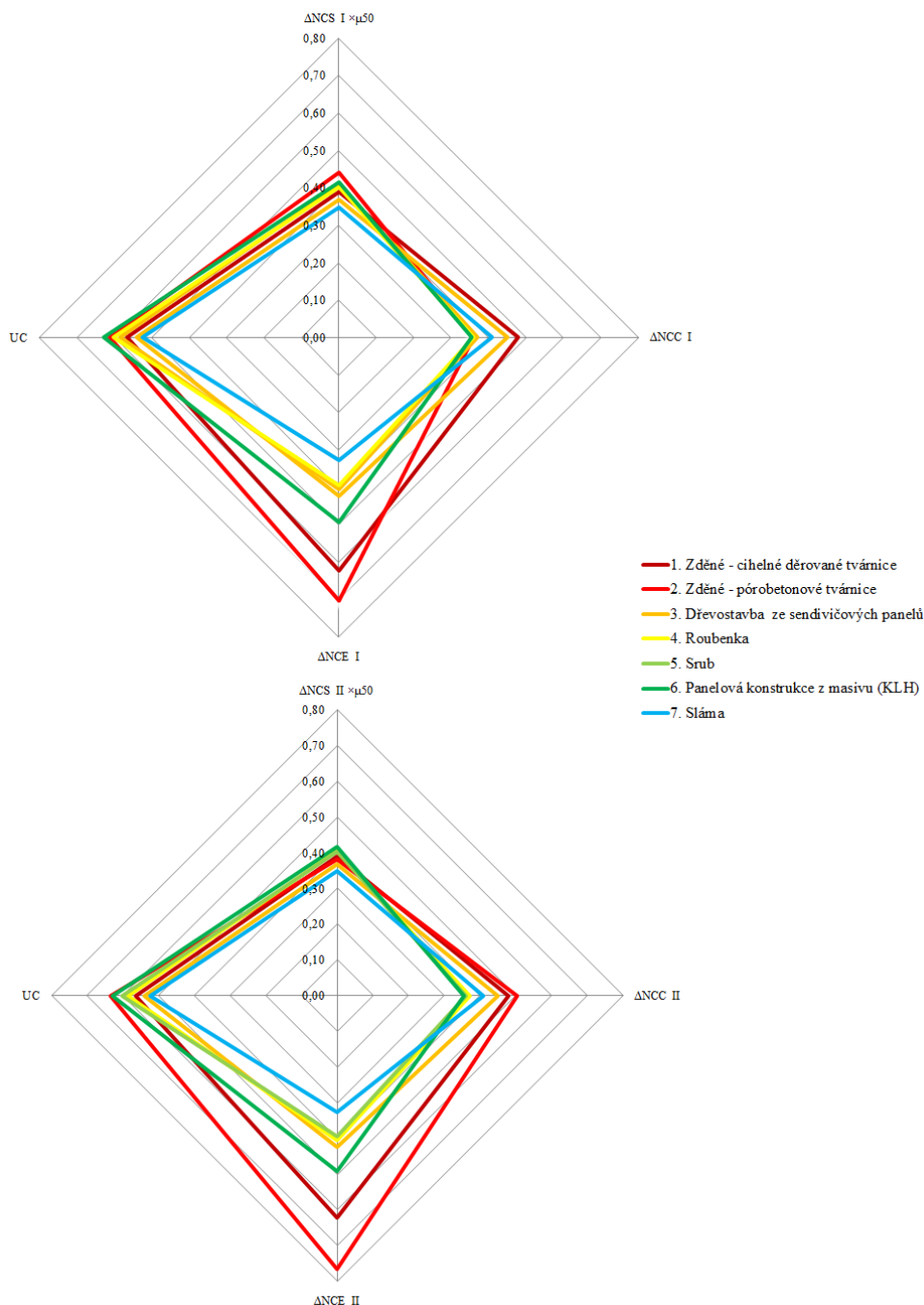
3. Dřevostavba ze sendvičových panelů, 4. Roubenka, 5. Srub a 7. Sláma. Stejně pořadí dosahuje i varianta II s tím rozdílem, že poměrový ukazatel je u konstrukce č. 2 výraznější. Nejvýhodnější konstrukce je konstrukce 7. Sláma.



Graf 3: Porovnání vázané energie k nákladům na výstavbu

Co se týče potenciální prospěšnosti, může být na tento aspekt nahlíženo z více pohledů. Z ekonomického hlediska je pro uživatele nejvýhodnější využít konstrukci 3. Dřevostavba ze sendvičových panelů. Pokud bude na problematiku nahlíženo z pohledu nejvýhodnější hladiny celkového spotřebovaného svázaného uhlíku je nejvhodnější konstrukce typu 6. Panelová konstrukce z masivu (KLH). Z pohledu celkové vázané spotřebované energie je nejvýhodnější konstrukce 7. Sláma. V momentě, kdy budou výše uvedená celková hlediska zpracována poměrovým způsobem, zdá se být z hlediska porovnání nákladů na výstavbu k obestavěné ploše nejvýhodnější konstrukce 7. Sláma. V případě porovnání svázaného uhlíku k nákladům na výstavbu je nejvýhodnější konstrukce 6. Panelová konstrukce z masivu (KLH). A v momentě, kdy bude porovnávána svázané energie k nákladům na výstavbu, je nejvýhodnější konstrukce 7. Sláma. Obecně je tedy možné říct, že při takto nastavené metodice a při obdobném součiniteli prostupu tepla konstrukce jako u dalších šesti konstrukcí je z ekonomického hlediska a hlediska trvale udržitelného rozvoje nejvyšší potenciální prospěšnost pro uživatele domů konstrukce 7. Sláma. Hlavní hypotéza byla tedy do velké míry potvrzena a při takto nastavené metodice je možné říct, že výstavba z materiálů, které potřebují minimum dodatečných energetických vkladů, je méně energeticky a finančně náročná. Ohledně produkce CO<sub>2</sub> je možné se také s touto částí hypotézy ztotožnit, jelikož náročnost na celkový svázaný spotřebovaný uhlík je u konstrukcí s dominantní materiálovou skladbou na bázi obnovitelných materiálů nižší. Trapezoidická analýza ukázala, že největší trapezoidické analytické plochy dosahuje konstrukce č. 2. Nejnižší hodnotu trapezoidické analytické plochy dosahuje konstrukce č. 7. Tento údaj je relativně důležitý k prvotnímu analytickému posouzení. Dále je třeba sledovat konkrétní hodnoty ukazatelů. Z analýzy je patrné, že největší rozdíly u staveb vykazuje ukazatel  $\Delta_{NCE I}$ . Ostatní ukazatele se liší relativně méně. Z globálního hlediska je tedy možné tvrdit, že největší rozdíl mezi navrženými konstrukcemi je v oblasti vázané spotřebované energie. Při volbě konstrukčního systému budovy je tedy vhodné pohlížet na skladbu materiálů použitou ve stavbě. Například stavba zděná z pórobetonových tvárnic a z cihelných děrovaných tvárnic z tohoto hlediska dosahují poměrně vysokou hodnotu uvedeného ukazatele. Obdobě dosahuje vyšších hodnot stavba panelová z masivu. Nejnižší hodnotu ukazatele  $\Delta_{NCE I}$  dosahuje stavba s dominantním zastoupením slámy, srub, roubenka a dřevostavba ze sendvičových panelů. Obdobě pro Variantu II setrvává stanovisko, že největší

trapezoidické analytické plochy dosahuje konstrukce č. 2. Tato plocha oproti variantě I narostla nejen v ukazateli  $\Delta_{NCE}$ , ale také narostla v ukazateli  $\Delta_{NCC}$ . Při řešení materiálové skladby stavby je tedy nutné zohledňovat různé varianty skladeb konstrukcí. Uvedené je možné vizualizovat v následujících grafech.



Obr. 1: Grafické zobrazení trapezoidické analýzy pro konstrukce 1-7, varianta I nahoře, II dole



Prospěšnost na základě kvantitativní analýzy výpovědi respondentů ukázala, že je do značné míry podstatné, zda se respondenti o problematiku energetické šetrnosti, potažmo vázané spotřebované energie, resp. svázaného spotřebovaného uhlíku zajímají a jsou v takové situaci, kdy řeší bydlení. Prospěšnost také respondenti shledávají v případné podpoře státu.

Předložená analýza a metodologický návrh řešení komparace staveb je vhodné využívat při posuzování staveb. Sedm uvedených variant staveb je možné do určité míry brát za referenční a v případě dalšího vědeckého bádání v této oblasti mohou uvedené konstrukce být nápomocny s porovnáním adekvátních variant. Z praktického hlediska je pak možné případným zájemcům o projekt, resp. stavbu domu nabídnout varianty řešení, které mohou zohlednit konkrétní požadavky zákazníků. Například pro zájemce se silným ekologickým cítěním je možné nabídnout varianty jemu bližší a případně tyto varianty porovnat s dalšími možnostmi.

#### 4 DISKUSE

Tématikou vázané energie a svázaného uhlíku se zabývá a publikuje například Abanda a kol.[1], který porovnával budovy z nepálených hliněných cihel (Mud-brick) a betonových tvárnic (Cement-block). Vzhledem k tomu, že absolutní hodnoty na stavbu jsou v důsledku rozdílnosti půdorysu a dalších parametrů logicky odlišné, může být posouzen rozdíl v procentech. Uvedení autoři došli k výsledkům 292326,81 MJ vázané spotřebované energie a 37829,19 kg CO<sub>2</sub> svázaného spotřebovaného uhlíku pro stavbu z betonových tvárnic. Pro stavbu z nepálených hliněných cihel došli k výsledkům 137934,91 MJ vázané spotřebované energie a 15665,56 kg CO<sub>2</sub> svázaného spotřebovaného uhlíku. Rozdíl je tedy cca 47 % v případě vázané energie a 41 % v případě svázaného spotřebovaného uhlíku. V této práci nebyly přímo tyto konkrétní materiály porovnávány, je však možné uvedených 7 konstrukcí rozdělit na konstrukce z cihelných děrovaných tvárnic a pórobetonu (1-2) a další konstrukce (3-7). Porovnáme-li tyto konstrukce mezi sebou co do průměrného procentuálního rozdílu, je rozdíl mezi konstrukcemi 1-2 a 3-7 pro svázaný spotřebovaný uhlík cca 13 % pro variantu I a 22 % pro variantu II. Obdobně v případě vázané spotřebované energie vychází průměrný procentní rozdíl pro konstrukce 1-2 a 3-7 pro variantu I 48 % a pro variantu II 45 %. V případě svázaného uhlíku vychází rozdíl menší než u výše uvedených autorů, ale je třeba opětovně zmínit, že autoři nepopisovali identické materiály, jaké jsou uvedeny v této práci. Ohledně vázané spotřebované energie jsou již procentuální rozdíly bližší výše uvedeným autorům. Obdobně autoři Hammond a Jones [3] uvádějí vázanou energii pro různé typy budov. Bohužel v jejich práci není konkrétní specifikace staveb (materiálová, konstrukční apod.). Ve svých výsledcích uvádějí, že v nově postaveném anglickém domě dosahuje vázaná energie lehce nad 5000 [MJ×m<sup>-2</sup>] a svázaný uhlík lehce nad 140 [kgCO<sub>2</sub>×m<sup>-2</sup>]. V této práci dosahuje konstrukce 1-2 průměrně hodnotu vázané energie pro variantu I 8600 [MJ×m<sup>-2</sup>], pro variantu II 9400 [MJ×m<sup>-2</sup>]. Pro konstrukce 3-7 pak byla vypočtena hodnota 7500 [MJ×m<sup>-2</sup>]. Z takto zjištěných dat je tedy patrné, že výsledky výše uvedených autorů se blíží spíše konstrukcím 3-7, resp. je možné, že pokud se jedná o stavbu o velkém půdorysu, jedná se o budovu typu konstrukce 1-2. Autor Pullen [6] uvádí průměrné hodnoty vázané energie pro obytné budovy: 3600 [MJ×m<sup>-2</sup>] a Treloar [7] uvádí hodnotu 8760 [MJ×m<sup>-2</sup>]. Je patrná relativně velká variabilita, která může být způsobena metodologií, vstupními daty a dalšími okolnostmi. Autorka Milutienė [5] se ve svém článku zabývala vázanou energií budov a nulovým energetickým konceptem budov. Zaměřila se na budovy stavěné ze slámy. Z jejich výsledků je zřejmé, že vázaná spotřebovaná energie na stěny ze slámy dosahuje celkovou hodnotu přibližně 235 tisíc [MJ] a svázaný uhlík 17,2 tisíc [kgCO<sub>2</sub>]. V této práci bylo zjištěno, že konstrukce 7. Sláma dosahuje hodnotu vázané energie 639 tisíc [MJ] a 79 tisíc [kgCO<sub>2</sub>] svázaného uhlíku. Tento rozdíl je z největší pravděpodobností dán celkovou konstrukcí stavby. U této práce byly základy zhotoveny z betonu, byla vytvořena železobetonová deska. Další rozdíly mohly být ve vnitřních příčkách, konstrukci střechy apod. Z autorčiny studie je patrné, že stavby ze slámy mají perspektivu z hlediska snižování vázané spotřebované energie a svázaného spotřebovaného uhlíku. Autor McHendry [4] ve své případové studii zkoumal sendvičové dřevostavby. Zjistil, že pro variantu ECO dosahuje vázaná

energie hodnotu 783 [GJ]. Řešil také variantu INTENSIVE, jenž dosáhla hodnot 1458 [GJ] vázané energie. V autorově studii je uvedeno, že celková plocha podlah dosahovala 162,5 [m<sup>2</sup>]. Opět tato budova není identická ke konstrukcím zpracovaným v této práci, nicméně je možná určitá komparace. Přepočtem je možné získat vázanou energii na m<sup>2</sup>. Výsledkem je tedy 4,8 [GJ×m<sup>-2</sup>] pro variantu ECO a 8,97 [GJ×m<sup>-2</sup>] pro variantu INTENSIVE. Získané údaje v této práci dosahují hodnot: konstrukce 1. Zděné – cihelné děrované tvárnice 6,69 [GJ×m<sup>-2</sup>]; 2. Zděné - pórobetonové tvárnice 14,60 [GJ×m<sup>-2</sup>] (15,48 varianta II); 3. Dřevostavba ze sendvičových panelů 7,76 [GJ/m<sup>2</sup>]; 4. Roubenka 8,26 [GJ×m<sup>-2</sup>]; 5. Srub 7,93 [GJ×m<sup>-2</sup>]; 6. Panelová konstrukce z masivu (KLH) 10,23 [GJ×m<sup>-2</sup>]; 7. Sláma 5,72 [GJ×m<sup>-2</sup>].

Ekonomickou část je třeba řešit z pohledu možností České republiky. Je pochopitelné, že náklady na výstavbu domů v jiných státech budou s největší pravděpodobností jiné. Problematikou porovnání pořizovacích cen dřevostaveb (bez srubů a roubenek) a zděných domů (z cihelných děrovaných tvární a z pórobetonu) se zabýval Kalousek, Lench [10]. Z jejich údajů je zřejmé, že dřevostavby s obdobným obestavěným prostorem (cca 550 m<sup>3</sup>) mají nižší cenu než zděné stavby. V případě této práce je rozdíl<sup>3</sup> mezi konstrukcí zděnou a konstrukcí dřevostavby obdobný, jak uvádějí autoři – cca 14 % u cihelných děrovaných tvární a 26 % u pórobetonové konstrukce. Grmela [2] se zabýval výstavbou domu ze slámy. V jeho práci dochází k výsledkům cca 9 tis. [Kč×m<sup>-2</sup>] užitá plocha, ovšem doplňuje, že takto nízká cena byla dána hlavně tím, že výstavba byla prováděna svépomocným způsobem. V této práci byla uvažována běžná průmyslová výstavba konstrukce 7. ze slámy a také možná z toho důvodu dosahuje nákladů na výstavbu hodnot cca 23 tis. [Kč×m<sup>-2</sup>] užitá plocha (ovšem i toto v porovnání s dalšími konstrukcemi je hodnota poměrně nízká). Další rozdíly mohou být dány specifikací stavby Grmelou a specifikací stavby v této práci. Je třeba také podotknout, že v této práci byly zpracovány modelové příklady. Ohledně cen srubů a roubenek byly získány údaje z webových stránek výrobců, např. společnosti Srubové domy s.r.o. [12], T.M.T. Srub s.r.o. [9], Roubenky a sruby Walter s.r.o. [11], Vaše roubenka CZ s.r.o.[8]. Na uvedených stránkách jsou však ve většině případů vedeny ceny za m<sup>2</sup> zastavěné plochy hrubé stavby. Celkově vychází průměrné ceny srubů kolem 9 tis. [Kč×m<sup>-2</sup>] zastavěné plochy a průměrné ceny roubenek se pohybují kolem 10 tis. [Kč×m<sup>-2</sup>]. V této práci byly zjištěny náklady cca 20 150 [Kč×m<sup>-2</sup>] obestavěné plochy v případě srubu a 20 340 [Kč×m<sup>-2</sup>] u roubenek. Opět je třeba zdůraznit, že kalkulace uvedené v této práci nejsou pro hrubou stavbu, nicméně drobný rozdíl mezi cenou (náklady) srubu a roubenky i zde existuje.

Nově navrženou metodologii pro posuzování staveb – trapezoidickou analýzu – nebylo možné aplikovat na již publikované práce (uvedené např. výše), neboť tyto práce reflektují jiné, resp. dílčí skutečnosti a v celku analýzy by tedy nedávaly smysl. Nicméně se dalším autorům nabízí možnost aplikovat navrženou metodologii v různých prostředích (např. EU) a tyto pak podrobit analýze a srovnání.

## 5 ZÁVĚR

Pro účely cíle této práce bylo navrženo sedm typů konstrukcí, které mají odrážet realitu z pohledů možnosti běžné výstavby na území ČR. Byly navrženy konstrukce: 1. Zděné - cihelné děrované tvárnice, 2. Zděné - pórobetonové tvárnice, 3. Dřevostavba ze sendvičových panelů, 4. Roubenka, 5. Srub, 6. Panelová konstrukce z masivu (KLH), 7. Sláma.

Tyto konstrukce byly dále členěny na část podlah, obvodových stěn a střešní konstrukce. Cílem bylo, aby jednotlivé typy konstrukcí měly v jednotlivých částech obdobné parametry, v tomto případě konkrétně součinitel prostupu tepla a zároveň tento součinitel splňoval požadavky dané

---

<sup>3</sup> Nutno podotknout, že v této práci bylo pracováno s kalkulacemi nákladů, ne kalkulacemi ceny a s obestavěnou plochou (ekvivalent zastavěné plochy s tím, že pro objekty poloodkryté a objekty zastřešené bez obvodových svislých konstrukcí je třeba zvolit individuální, upravený postup výpočtu), ne prostorem.

normou (ČSN 73 0540-2/2011). Následně byl vytvořen konstrukční návrh staveb. Vnitřní prostor staveb byl jednotný (85,20 m<sup>2</sup>) a vnější prostor se lišil podle tloušťek jednotlivých konstrukcí (konstrukce 1. = 110,90 m<sup>2</sup>, 2. = 107,48 m<sup>2</sup>, 3. = 102,49 m<sup>2</sup>, 4. = 111,64 m<sup>2</sup>, 5. = 109,46 m<sup>2</sup>, 6. = 105,25 m<sup>2</sup>, 7. = 111,81 m<sup>2</sup>). Takto sestavené modelové příklady byly následně posouzeny z hlediska stavebního, environmentálního (vázaná energie a svázaný uhlík) a ekonomického (sestavené modelové kalkulace výstavby). Výsledky byly dále zpracovávány a porovnávány jak co do absolutních hodnot, tak procentuálních hodnot a v neposlední řadě i z hlediska stanovených poměrových ukazatelů. Na základě zjištěných skutečností bylo dle poměrových ukazatelů vyjádřených v procentech<sup>4</sup> zjištěno, že náklady na výstavbu k obestavěné ploše dosahují pro konstrukci 7. Sláma nejvýhodnější poměr = 95 %, následuje 100 % pro 3. Dřevostavbu ze sendvičových panelů, 106 % pro 1. Zděnou z cihelných děrovaných tvárnic, 110 % pro 5. Srub, 111 % pro 4. Roubenku a 120 % (104 % varianta II) pro 2. Zděnou z pórobetonových tvárnic. Svázaný uhlík k nákladům na výstavbu dosahuje 78 % pro 6. Panelovou konstrukci z masivu (KLH), 80 % pro 5. Srub a 2. Zděnou konstrukci z pórobetonových tvárnic (varianta II 111 %), 82 % pro 4. Roubenku, 91 % pro konstrukci 7. Ze slámy, 100 % pro 3. Dřevostavbu ze sendvičových panelů a 107 % pro 1. Zděnou konstrukci z cihelných děrovaných tvárnic. Vázaná energie k nákladům na výstavbu dosahuje 79 % pro konstrukci 7. Ze slámy, 93 % pro 5. Srub, 98 % pro 4. Roubenku, 100 % pro 3. Dřevostavbu ze sendvičových panelů, 117 % pro 6. Panelovou konstrukci z masivu (KLH), 148 % pro 1. Zděnou konstrukci z cihelných děrovaných tvárnic, 167 % (183 % pro variantu II) pro 2. Zděnou konstrukci z pórobetonových tvárnic. Konečný výsledek pak vedl, do velké míry, k potvrzení hlavní hypotézy, tedy že výstavba z materiálů, které potřebují minimum dodatečných energetických vkladů, je méně energeticky a finančně náročná. Ohledně produkce CO<sub>2</sub> je možné se také s touto částí hypotézy ztotožnit, jelikož náročnost na celkový svázaný spotřebovaný uhlík je u konstrukcí s dominantní materiálovou skladbou na bázi obnovitelných materiálů zpravidla nižší. Tato perspektiva se zdá být i z pohledu provozu a údržby, příp. likvidace jednotlivých staveb reálná. Nutno podotknout, že tato analýza byla změřena na budovy méně podlažní, určené k obývání.

Z pohledu trapezoidické analýzy je patrné, že největší trapezoidické analytické plochy dosahuje konstrukce č. 2 zděná s dominantním zastoupením pórobetonových tvárnic a to jak ve variantě I, tak ve variantě II. Následují konstrukce č. 1 zděná s dominantním zastoupením z cihelných děrovaných tvárnic a konstrukce č. 6. panelová konstrukce z masivu. Nejnižší hodnoty trapezoidické analytické plochy dosahuje konstrukce č. 7 s dominantním zastoupením slámy, následovaná č. 5 – srub, 4. roubenka a 3 dřevostavba ze sendvičových panelů. Pro potvrzení těchto výsledků byly také zkoumány jednotlivé ukazatele, ze kterých je patrné, že rozdílnost konstrukcí je dána hlavně ukazatelem energetickým, ovšem i ostatní ukazatele (hledisko svázaného uhlíku, ekonomické hledisko, součinitel prostupu tepla), již v menší míře, odlišují jednotlivé typy konstrukcí.

Prospěšnost na základě kvantitativní analýzy výpovědi respondentů ukázala, že je do značné míry podstatné, zda se respondenti o problematiku energetické šetrnosti, potažmo vázané spotřebované energie, resp. svázaného spotřebovaného uhlíku zajímají a jsou v takové situaci, kdy řeší bydlení. Prospěšnost také respondenti shledávají v případné podpoře státu.

Trapezoidická analýza pak otvírá další možnosti porovnávání staveb a to jak na trhu České republiky, tak na dalších trzích (např. EU). Uvedená metodika je navržena univerzálně tak, aby ji bylo možné snadno aplikovat i v jiných prostředích. Podstatné je však také celkové posouzení na konkrétním případě se zohledněním všech nuancí.

---

<sup>4</sup> Konstrukce 3. Dřevostavba ze sendvičových panelů = 100 %.

## LITERATURA

- [1] ABANDA, F.Henry, G.Elambo NKENG, Tah J.H.M, Ohandja E.N.FABRICE a Manjia M.BLANCHE. Embodied Energy and CO2 Analyses of Mud-brick and Cement-block Houses. AIMS's Energy. 2014, Volume 2, Issue 1, 18–40. DOI: 10.3934/energy.2014.1.18.
- [2] GRMELA, Daniel. Nízkorozpotový pasivní dům z přírodních a recyklovaných materiálů. In: JUNIORSTAV 2011: 8. Udržitelná výstavba budov a udržitelný rozvoj sídel. 2011, s. 1-14. Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/8/Grmela\\_Daniel\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2011/pdf/8/Grmela_Daniel_CL.pdf)
- [3] HAMMOND, G. P. a C. I. JONES. Embodied energy and carbon in construction materials. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Energy. 2008, č. 2. ISSN: 1751-4223. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>
- [4] MCHENDRY, Stuart a Paul TUOHY. The Embodied Energy and Carbon of Passive House. Glasgow: Department of Mechanical and Aerospace Engineering, 2013.
- [5] MILUTIENĚ, Edita. House Embodied Energy and Zero Energy Building Concept. Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba. 2010. ISSN: 2029-2139.
- [6] PULLEN, S. Estimating the embodied energy of timber building products, Journal of the Institute of Wood Science, 2000, Volume (15), s. 147-151.
- [7] TRELOAR, Graham John. A Comprehensive Embodied Energy Analysis Framework. Deakin University, Victoria, Australia, 1998.
- [8] Cena roubenky. VAŠE ROUBENKA CZ S.R.O. Vaše Roubenka.cz [online]. 2014 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.vaseroubenka.cz/cena-roubenky/>
- [9] Fotogalerie a ceník: Sruby a roubenky. T.M.T. SRUB S.R.O. Srub.cz [online]. 2014 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.srub.cz/fotogalerie-a-cenik/sruby-a-roubenky/>
- [10] KALOUSEK, František a Josef LENOCH. Porovnání pořizovacích cen dřevostaveb a zděných domů v ČR. Dřevo&Stavby [online]. 2009 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://www.drevoastavby.cz/cs/casopis-drevo-a-stavby/dodatky-k-casopisu/584-o-cenach-drevostaveb-das-62009>
- [11] Nový katalog Studií. ROUBENKY A SRUBY WALTER S.R.O. Žijeme s přírodou: [www.sruby-roubenky.cz](http://www.sruby-roubenky.cz) [online]. 2014 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.sruby-roubenky.cz/katalog-domu.html>
- [12] Sruby a roubenky katalog 2014. SRUBOVÉ DOMY S.R.O. *Haniš sruby a roubenky* [online]. 2014 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.srubovedomy.cz/katalog>

### Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Jan Česelský, Ph.D., Katedra městského inženýrství, Fakulta stavební, VŠB-TU Ostrava.

Doc. Ing. Jana Korytářová, Ph.D., Ústav stavební ekonomiky a řízení, Fakulta stavební, VUT v Brně.